

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.11.012

吕润泽, 聂华伦, 白勇, 等. 重庆不同林龄花椒地土壤化学肥力及质量评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(11): 153-164.

重庆不同林龄花椒地土壤化学肥力及质量评价

吕润泽¹, 聂华伦², 白勇², 毕琳娜¹, 李兵¹, 田锐¹

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 江津区规划和自然资源局, 重庆 江津 402260

摘要: 花椒作为一种经济作物, 与人们的生活息息相关. 为明晰花椒种植年限对土壤肥力情况的影响, 以重庆市江津区不同林龄花椒土壤(灰棕紫泥土)作为研究对象, 采集了先锋镇、石门镇、蔡家镇和油溪镇的 116 组土样, 并分析测定其 pH 值及有机质在内的 15 项土壤肥力指标. 基于此, 通过主成分分析和构建最小数据集的方法对土壤化学肥力和质量进行综合评价. 研究表明: 影响花椒地土壤肥力的主要肥力因子为有效磷, 其次为全磷和全氮; 随着花椒种植年限的增长, 土壤的肥力情况和土壤质量指数均略有增进, 从大到小依次为: 林龄 15~20 a、林龄 10~15 a、林龄 0~5 a、林龄 5~10 a, 但差异间无统计学意义. 与全国第二次土壤普查时期该地区同一母质发育的灰棕紫泥土肥力指标平均值对比发现, 多年花椒种植使得土壤质量指数升高. 各林龄花椒地的综合肥力情况为全磷、全钾、有效磷等养分指标情况良好, 有效金属微量元素含量丰富, 有机质含量较少, 有机质可通过花椒枝条还田和施用商品有机肥等方式做适当补充.

关键词: 青花椒; 土壤肥力; 主成分分析; 最小数据集

中图分类号: X825 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)11-0153-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soil Chemical Fertility and Quality in Different Tree Ages of *Zanthoxylum* Fields in Chongqing

LYU Runze¹, NIE Hualun², BAI Yong²,
BI Linna¹, LI Bing¹, TIAN Rui¹

1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Jiangjin District Planning and Natural Resources Bureau, Jiangjin Chongqing 402260, China

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1900304); 国家自然科学基金项目(41501241); 西南大学青年团队专项基金资助项目(Swu-xjpy202303).

作者简介: 吕润泽, 硕士研究生, 主要从事土壤胶体界面化学研究.

通信作者: 田锐, 副教授, 硕士研究生导师.

Abstract: As a kind of economic crop, *Zanthoxylum* is closely related to people's life. In order to grasp the influence of *Zanthoxylum* planting years on soil fertility, the soil (gray brown purple soil) of *Zanthoxylum* fields with different Planting years in Jiangjin district, Chongqing was taken as the research object. 116 groups of soil samples were collected from Xianfeng Town, Shimen Town, Caijia Town and Youxi Town. Fifteen soil fertility indexes including pH and organic matter were analyzed and determined, and then the soil chemical fertility and quality was comprehensively evaluated by principal component analysis and minimum data set method. The results showed that the main fertility factor affecting the soil chemical fertility of *Zanthoxylum* was available phosphorus, followed by total phosphorus and total nitrogen. With the increase of *Zanthoxylum* planting years, soil fertility and soil quality index showed an increasing trend in the order of 15—20 planting years, 10—15 planting years, 0—5 planting years, 5—10 planting years, although the differences were not significant. Compared with the average value of the same parent material soil in the region derived from the second national soil census, the soil quality index was increased by *Zanthoxylum* planting years. The comprehensive soil fertility in *Zanthoxylum* planting areas with different ages could be summarized as: nutrient indexes, such as total phosphorus, total potassium and available phosphorus, was in good level; the content of effective metal trace elements was rich, while soil organic matter content was lower, which could be properly supplemented by returning *Zanthoxylum* branches to the field and applying commercial organic fertilizer.

Key words: green peppercorn; soil fertility; principal component analysis; minimum data set

花椒是芸香科、花椒属灌木或落叶小乔木,在我国北部至西南地区的庭院周围、低山丘陵、梯田边缘均有栽培。花椒栽植简便、生长快、耐贫瘠、耐干旱,具有重要的绿化和保水固土等生态价值。青花椒对土壤、气候等环境因子的适应性强,近十年种植发展快,产业规模发展迅速。重庆市江津区是重庆青花椒的重要产地,但由于农民习惯性投入高于推荐标准量的速效氮磷钾肥,使得不合理施肥成为限制该地区花椒产业发展的因素之一^[1]。杨仕曦等^[2]对九龙坡花椒种植区的花椒产量和肥力因子进行分析,发现花椒产量与土壤 pH 值、有效钙、阳离子交换量和有效锰等肥力指标有显著的正相关关系。土壤肥力状况对花椒产量有着重要影响,受施肥状况和土壤肥力等因素的影响,重庆市花椒产量为 1.63~18.70 t/hm²^[3],变化范围较大。

土壤肥力是指土壤养分对植物吸收的供给能力,同时也是土壤环境条件的综合体现,受到养分状况、植物吸收和环境因素的共同影响^[4]。土壤肥力的评价方法有主成分分析法、聚类分析法、模糊综合评价法和地统计学法等^[5-7]。叶少萍等^[8]基于主成分分析得出,珠海区古树土壤肥力的限制性因子为全磷和全钾;赵敬坤等^[9]通过模糊综合评价法计算分析得出,重庆花椒种植区土壤肥力等级水平在中等偏上水平。土壤肥力对作物生长和农业生产有重要作用,因此要更加重视对土壤肥力的综合评价。土壤质量的高低关乎土壤的环境健康程度及农作物的产量,是反映土壤优劣的重要评价标准。房雪等^[10]通过对延边州栽参及参后地土壤进行肥力评价,得出农田栽参后土壤状况较差,参后地更为严重;杨丹丽等^[11]通过对干热河谷石漠化区域的土壤质量分析发现,花椒地土壤质量指数较其他农作物用地最高;王璐等^[12]对不同衰老程度花椒地土壤质量指数进行比较,得出衰老较轻的花椒植株土壤质量优于衰老严重的花椒植株土壤。不同的种植年限也会对土壤肥力和土壤质量产生影响,刘姣姣等^[13]对甘肃陇南花椒连作土壤进行分析发现,花椒连作会使土壤肥力下降,抑制土壤酶的活性。但目前对多年栽植的花椒园进行土壤肥力及土壤质量综合评价的研究较少。因此,为了更好地了解花椒种植年限对花椒土壤肥力情况的影响,在重庆市江津花椒种植区采

集不同林龄花椒地的土壤, 选用 pH 值、电导率和有机质等 15 项评价指标, 进行主成分分析并建立最小数据集, 综合评价重庆市江津花椒种植区土壤肥力水平以及长期种植花椒对土壤质量的影响, 以为当地花椒种植的优化布局及可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区概况

江津区位于重庆市西南部, 属于北半球中亚热带湿润季风气候区, 年平均温度 18.4 °C, 年平均降雨量为 1 001.2 mm 左右, 地形以山地和丘陵为主。花椒是该地区主要的经济作物, 品种为九叶青花椒。花椒种植时, 栽培间距设置为 2~3 m, 采用“主枝回缩矮化密植”栽培技术, 在花椒成熟收获时(5 月下旬至 7 月上旬)一并剪下花椒果实和枝条, 仅留树桩, 萌发的新枝梢为来年的结果枝。根据同步开展的农户调研, 选择施肥管理接近的地块布点采集土样。施肥管理平均水平控制在总施氮量约 350 kg/hm², 总施磷量约 220 kg/hm², 总施钾量约 280 kg/hm²。

1.2 土壤样品采集

根据重庆市江津区花椒分布面积, 选择 4 个主产乡镇(先锋镇、蔡家镇、油溪镇、石门镇), 每个乡镇选取 2~4 个主产自然村进行布点采样。土壤样品采集时间为花椒收获后的窗口期(2023 年 5 月 30 日至 2023 年 7 月 15 日), 可有效避免施肥、灌水等的影响。采集土壤样品均为灰棕紫泥土, 由侏罗系沙溪庙组灰棕紫色砂泥岩母质发育, 属初育土土纲、石质初育土亚纲、紫色土土类。土壤样品采集按照代表性和典型性原则, 每一样方内沿“S”形选择 5 株采样花椒树, 采集树冠滴水线周围 4 个点的表层土样, 采样深度为 20 cm; 将每个采样点的土壤混匀, 剔除土壤中砾石、根系等, 用“四分法”取土样约 500 g 装入已编码的采样袋。取好的土样带回实验室进行风干处理, 分别过 1 mm 筛、0.25 mm 筛后备用。

1.3 土壤指标测定

本研究共测定土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾等 15 项土壤肥力指标。其中, 土壤 pH 值采用电位法(土水比 1:2.5)测定, 有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 全氮采用凯氏定氮法测定, 全磷采用钼锑抗比色法测定, 全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定, 全钙和全镁采用原子吸收分光光度计法测定, 速效氮采用碱解扩散法测定, 速效磷采用 0.5 mol/L 氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定, 速效钾采用 1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度法测定, 速效钙和速效镁含量采用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度法测定^[14]。

1.4 主成分分析法评价土壤肥力

通过主成分分析法, 对已测定的 15 项土壤化学肥力指标进行降维, 结合各主成分的因子负荷和标准化养分含量状况可以对土壤肥力水平综合得分进行计算, 其计算公式为,

$$Z_i = \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (1)$$

式中: Z_i 为各主成分的得分; a_i 为养分指标所占的因子负荷; X_i 为标准化后的养分含量值; n 为统计肥力指标的数量。

1.5 土壤质量评价方法

对土壤肥力指标通过统一标准化函数求得线性得分值, 标准化函数使用 S 型隶属度函数和抛物线型隶属度函数^[15-16], 并根据主成分分析中肥力指标的权重进行土壤质量指数的计算。S 型隶属度函数主要用于评价和土壤肥力呈正相关的肥力因子, 包括全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁、有效铁、有效锰、有效铜和有效锌, 其计算公式如下:

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 1.0 & x \geq a_2 \\ 0.9 \left(\frac{x - a_1}{a_2 - a_1} \right) & a_1 < x < a_2 \\ 0.1 & x \leq a_1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: a_1 为指标的最小值; a_2 为指标的最大值.

抛物线型隶属度函数主要用于有合理范围的土壤肥力指标, 包括 pH 值、电导率和有机质等. 比如, 花椒植株适宜生长的土壤 pH 值为 6.0~7.5, 过酸和过碱的土壤环境对于花椒的生长均不太理想. 土壤有机质的含量有一定的阈值; 在阈值内, 土壤肥力随有机质含量的增加而增加, 而超过阈值后, 土壤肥力随有机质含量的增加不再变化或略有下降. 抛物线型隶属度函数的计算公式如下:

$$u(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 1.0 & a_4 < x \leq a_5 \\ 1 - 0.9 \left(\frac{x - a_5}{a_6 - a_5} \right) & a_5 < x < a_6 \\ 0.1 + 0.9 \left(\frac{x - a_3}{a_4 - a_3} \right) & a_3 < x \leq a_4 \end{array} \right\} \quad (3)$$

式中: a_3 为指标的最小值; a_6 为指标的最大值; a_4 为适宜值的下界; a_5 为适宜值的上界.

土壤质量指数计算公式^[17]如公式(4)所示:

$$N_{SQI} = \sum_{i=1}^n X_i \cdot S_i \quad (4)$$

式中: N_{SQI} 为土壤质量指数; X_i 为土壤养分指标的权重; S_i 为土壤指标的线性得分; n 为统计肥力指标的数量.

1.6 数据处理

数据经 Excel 处理和整理后, 采用 SPSS 18.0 进行综合统计分析和主成分分析, 用 Origin 2021pro 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量水平

不同林龄花椒地土壤的养分指标统计分析结果及不同镇土壤基础性质如表 1 所示. 供试土壤整体呈酸性, 土壤 pH 值最大为 6.58. 土壤有机质平均为 20.67 g/kg, 按照全国第二次土壤普查养分分级评价标准, 属于中等偏下水平. 全氮、全磷、全钾的均值分别为 0.99, 0.72, 18.99 g/kg, 属于中等水平. 碱解氮含量较为丰富, 均值为 101.00 mg/kg. 部分土样的碱解氮、有效磷和速效钾含量极高, 最高值分别达到了 396.74, 258.34, 732.50 mg/kg, 且远超极高养分含量标准. 土壤有效金属微量元素含量丰富. 通过多年花椒种植, 土壤养分水平有所提升. 同 2006 年土壤养分指标的均值相比, 有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、有效铁、有效锰和有效铜含量均明显升高, 有效锌含量变化不明显^[18]. 不同镇之间 pH 值、有机质、全氮、全钾、有效铜和有效锌差异不大, 其中蔡家镇较另外 3 个镇土壤肥力情况更好, 全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙和有效锰的均值都较高. 油溪镇花椒地土壤有效铁含量较高, 均值为 125.21 mg/kg, 全磷、碱解氮、有效磷和另外 3 个镇相比较为缺乏, 均值分别为 0.46 g/kg, 85.04 mg/kg, 41.02 mg/kg. 先锋镇花椒地土壤交换性镁含量较为丰富, 均值为 320.17 mg/kg.

表 1 不同林龄及不同镇花椒地土壤肥力指标统计结果

林龄/ 地域	项目	pH 值	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	交换性钙/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	交换性镁/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效铁/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效锰/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效铜/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效锌/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~5 a	均值	4.84	166.82	20.81	1.00	0.71	18.94	101.52	62.42	304.81	4 506.59	284.74	109.65	51.81	1.28	1.89
	极大值	6.41	449.00	33.29	1.98	1.67	24.96	159.10	188.95	715.00	6 725.81	426.59	218.56	106.31	2.73	3.12
	极小值	4.02	46.05	8.07	0.47	0.24	13.87	85.07	5.55	77.00	1 533.37	92.51	10.56	7.73	0.38	0.55
	标准差	0.654	94.674	6.683	0.290	0.367	2.533	46.977	54.829	185.198	1 549.345	75.816	49.632	29.811	1.253	0.913
5~10 a	均值	4.95	168.5	21.25	0.96	0.69	18.49	89.99	54.99	285.01	4 850.19	271.91	106.06	44.86	1.29	2.06
	极大值	6.58	422.50	47.05	1.52	1.63	22.94	151.04	181.48	665.00	7 348.53	439.19	194.08	92.50	2.92	5.07
	极小值	3.79	48.70	11.15	0.61	0.24	13.71	48.33	4.59	790.00	1 872.14	50.59	5.56	1.72	0.54	0.68
	标准差	0.777	90.976	7.451	0.230	0.357	2.345	27.170	43.152	172.843	1 257.250	76.453	50.302	24.876	0.492	0.999
10~15 a	均值	4.90	162.21	20.26	0.98	0.78	19.32	101.94	68.26	327.50	4 443.48	296.34	101.27	58.14	1.01	1.64
	极大值	6.39	407.00	32.09	1.62	1.68	24.39	396.74	258.34	732.50	7 884.25	441.44	213.08	128.07	2.03	3.53
	极小值	3.89	49.30	10.47	0.58	0.33	11.10	55.35	7.26	720.00	1 230.29	92.28	6.90	5.46	0.43	0.69
	标准差	0.644	98.811	5.764	0.242	0.332	2.570	53.122	57.142	180.245	1 779.877	70.635	51.980	31.446	0.428	0.708
15~20 a	均值	4.60	198.83	21.44	1.07	0.74	19.17	108.49	82.43	393.00	3 599.85	324.22	104.50	66.32	2.40	2.13
	极大值	4.99	315.00	35.71	1.87	1.83	22.35	160.11	239.65	592.50	5 928.78	371.88	130.12	122.71	13.42	6.52
	极小值	4.09	92.85	12.62	0.60	0.24	14.52	78.54	12.60	137.50	1 961.36	196.55	40.88	27.00	0.52	1.26
	标准差	0.288	73.903	7.992	0.346	0.539	2.535	26.850	80.858	159.501	1 297.448	58.861	25.268	27.919	3.921	1.566
先锋镇	均值	5.23	181.61	21.69	1.09	0.81	19.19	102.77	64.02	317.29	3 505.79	320.17	93.10	55.68	1.19	1.95
石门镇	均值	4.85	167.70	21.28	0.96	0.65	18.54	90.78	53.28	286.13	5 338.59	250.81	105.00	41.95	1.19	1.90
蔡家镇	均值	4.70	171.96	20.38	1.02	0.83	19.27	117.30	80.79	351.51	5 521.55	289.34	115.72	57.53	1.59	1.77
油溪镇	均值	4.56	139.55	18.38	0.87	0.46	18.84	85.04	41.02	235.97	2 758.99	271.09	125.21	50.33	0.90	2.02

2.2 主成分分析

主成分分析是在将肥力指标水平作为原变量的基础上进行的数据降维和变量挖掘, 将多个变量通过降维转化为少数综合变量, 对各个土壤肥力指标的主要成分^[18]进行提取. 对土壤的各个肥力指标进行相关性分析, 经过 KMO 和 Bartlett 球形度检验, KMO 的值为 0.719, Bartlett 球形度检验的相伴概率小于 0.050, 结果有统计学意义, 说明各个肥力指标之间存在相关性, 可以进行主成分分析. 由公因子方差可知, 主成分包含了各肥力指标至少 60.800% 的信息量, 在表 2 各个肥力指标中, 土壤有效磷的信息损失量最小, 损失量为 0.079, 交换性钙的信息损失量最大, 损失量为 0.392. 综上分析可知, 江津区花椒地土壤肥力变化的主要影响因子为有效磷.

表 2 各肥力指标的公因子方差

指标	初始	提取	指标	初始	提取
pH 值	1	0.799	速效钾	1	0.765
电导率	1	0.636	交换性钙	1	0.608
有机质	1	0.632	交换性镁	1	0.818
全氮	1	0.859	有效铁	1	0.804
全磷	1	0.898	有效锰	1	0.771
全钾	1	0.689	有效铜	1	0.729
碱解氮	1	0.692	有效锌	1	0.762
有效磷	1	0.921			

使用 SPSS 软件对测定的 15 项土壤肥力指标进行主成分分析, 结果如表 3 所示. 提取出特征值 >1 的主成分 5 个. 5 个主成分的特征值分别为 4.869, 2.642, 1.705, 1.124 和 1.043, 方差贡献率分别为 32.463%, 17.615%, 11.364%, 7.494% 和 6.951%, 积累方差贡献率达到 75.888%, 可以较好反映土壤肥力的综合状况. 其中各个肥力指标在主成分中的权重有所不同, 因子负荷越大在主成分中的权重也越大^[19]. 电导率、全氮、全磷、有效磷和速效磷在主成分 1 中因子负荷较高; 有效铁、pH 值、全钾以及交换性镁在主成分 2 中有着较高的因子负荷; 有效铜和有效锌在主成分 3 中因子负荷较高; 有效锰在主成分 4 中因子负荷较高; 全磷、有效磷和交换性镁在主成分 5 中有较高的因子负荷.

表 3 各肥力指标主成分分析结果

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
pH 值	-0.419	0.655	0.394	0.186	-0.07
电导率	0.777	0.076	-0.143	0.074	0.038
有机质	0.422	-0.084	0.52	0.393	0.149
全氮	0.837	-0.014	0.166	0.215	0.291
全磷	0.769	0.263	0.007	-0.018	-0.488
全钾	0.375	0.649	-0.224	0.064	0.271
碱解氮	0.699	-0.084	-0.173	0.313	0.261
有效磷	0.81	-0.112	-0.138	-0.105	-0.471
速效钾	0.837	0.033	-0.199	0.089	-0.126
交换性钙	-0.01	0.589	0.197	0.388	-0.266
交换性镁	0.291	0.658	0.13	-0.311	0.432
有效铁	0.368	-0.778	-0.123	-0.024	0.219
有效锰	0.382	0.476	-0.253	-0.577	0.05
有效铜	0.332	-0.127	0.717	-0.289	-0.063
有效锌	0.398	-0.25	0.665	-0.313	0.012
特征值	4.869	2.642	1.705	1.124	1.043
方差贡献率/%	32.463	17.615	11.364	7.494	6.951
积累方差贡献率/%	32.463	59.078	61.442	68.937	75.888

将不同肥力指标含量数据和相应主成分得分系数进行求和, 得到基于各主成分的养分综合得分^[20], 结果如表 4 所示. 由于样品数量较大, 因此将相同林龄的组类进行求和后求平均值, 可得到不同林龄间的肥力评价综合得分, 由此可根据肥力综合得分对花椒种植区土壤肥力进行综合评价. 得分越高, 说明养分元素含量越高, 土壤肥力情况越好. 林龄在 15~20 a 的花椒园地土壤肥力水平较高, 主成分综合得分为 4.526, 平均综合得分为 0.503; 10~15 a 林龄的花椒园地主成分综合得分为 1.912, 平均综合得分为 0.050, 土壤肥力情况居中; 0~5 a 和 5~10 a 林龄的花椒园地主成分综合得分分别为 -1.590 和 -4.854, 平均综合得分分别为 -0.049 和 -0.139, 土壤肥力情况较差. 综上可知, 土壤肥力水平随花椒种植年限增加略有提升.

表 4 不同林龄花椒地全数据集平均综合得分

林龄	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	综合得分	平均综合得分	等级
0~5 a	-0.820	-8.436	-1.877	3.229	7.443	-1.590	-0.049	3
5~10 a	-10.782	-8.537	11.787	5.839	-6.585	-4.854	-0.139	4
10~15 a	2.380	13.862	-12.621	-1.532	-3.039	1.912	0.050	2
15~20 a	9.220	3.106	2.709	-7.539	2.177	4.526	0.503	1

2.3 相关性分析

将测定的各土壤肥力指标数据进行标准化处理后进行相关性分析, 结果如表 5 所示. 其中, 电导率和交换性钙以及有效铜无明显相关性, 和全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有效锰、有效锌呈极显著相关, 和有机质、交换性镁、有效铁呈显著相关; 全氮和交换性钙无明显相关性, 和有效锰呈显著正相关, 和全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性镁、有效铁、有效铜、有效锌呈极显著正相关; 全磷和交换性镁、有效铜呈显著正相关, 和全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有效锰、有效锌呈极显著正相关; 有效铜和有效锌呈极显著正相关, 其余的指标之间存在不同程度的相关性.

表 5 土壤肥力评价指标的相关性分析结果

	pH 值	电导率	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾	交换性钙	交换性镁	有效铁	有效锰	有效铜	有效锌
pH 值	1														
电导率	-0.287 **	1													
有机质	-0.016	0.225 *	1												
全氮	-0.250 **	0.665 **	0.499 **	1											
全磷	-0.080	0.540 **	0.227 *	0.505 **	1										
全钾	0.155	0.268 **	0.048	0.305 **	0.357 **	1									
碱解氮	-0.341 **	0.539 **	0.195 *	0.711 **	0.382 **	0.255 **	1								
有效磷	-0.443 **	0.541 **	0.209 *	0.500 **	0.837 **	0.161	0.426 **	1							
速效钾	-0.344 **	0.625 **	0.320 **	0.571 **	0.672 **	0.368 **	0.543 **	0.730 **	1						
交换性钙	0.376 **	0.044	0.050	0.017	0.179	0.254 **	-0.005	-0.067	-0.022	1					
交换性镁	0.247 **	0.213 *	0.086	0.278 **	0.231 *	0.536 **	0.104	0.019	0.193 *	0.183 *	1				
有效铁	-0.746 **	0.191 *	0.146	0.328 **	-0.017	-0.193 *	0.322 **	0.315 **	0.276 **	-0.413 **	-0.275 **	1			
有效锰	-0.099	0.339 **	-0.105	0.191 *	0.339 **	0.389 **	0.126	0.293 **	0.288 **	0.074	0.483 **	-0.198 *	1		
有效铜	-0.046	0.065	0.279 **	0.336 **	0.223 *	-0.096	0.118	0.254 **	0.069	0.063	0.136	0.152	0.037	1	
有效锌	-0.085	0.242 **	0.343 **	0.345 **	0.249 **	-0.143	0.100	0.232 *	0.200 *	-0.138	0.100	0.261 **	0.012	0.566 **	1

注: * 表示有统计学意义($p < 0.05$), ** 表示极有统计学意义($p < 0.01$).

2.4 基于最小数据集评价土壤质量

最小数据集(Minimum Data Set, MDS)的构建首先将主成分分析的各个肥力指标按照最小数据集要求进行分组, 提取每组主成分当中的因子负荷, 留下因子负荷 > 0.5 的养分指标. 把主成分 1 中因子负荷较大的电导率、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾归为组 1; 主成分 2 中因子负荷较大的 pH 值、全钾、

交换性钙、交换性镁和有效铁归为组 2；同理，有机质、有效铜和有效锌归为组 3；有效锰归为组 4。筛选出每一组当中最高 Norm 指标的肥力因子，保留和最高 Norm 值相差 10% 以内的其余肥力因子，并进行相关性比较，若相关系数较高 ($r > 0.5$) 则剔除，反之则和最大 Norm 值的肥力因子一同保留到最小数据集。通过上述步骤的筛选，最后进入最小数据集的指标包括有机质、全氮、全钾、交换性镁、有效铁、有效锰和有效锌，分组情况如表 6 所示。

表 6 各肥力指标分组情况及 Norm 值

	分组	Norm 值	最小数据集
pH 值	2	1.510	
电导率	1	1.730	
有机质	3	1.240	进入
全氮	1	1.890	进入
全磷	1	1.810	
全钾	2	1.400	进入
碱解氮	1	1.620	
有效磷	1	1.871	
速效钾	1	1.872	
交换性钙	2	1.100	
交换性镁	2	1.370	进入
有效铁	2	1.520	进入
有效锰	4	1.330	进入
有效铜	3	1.240	
有效锌	3	1.340	进入

对最小数据集进行验证，通过回归分析(图 1)，表明全数据集土壤质量指数和最小数据集土壤质量指数之间呈显著正相关 ($R^2 = 0.975$)，证明最小数据集可以在评价土壤质量中反映全数据集的整体情况。

再次通过主成分分析得出最小数据集的公因子方差及权重，由表 7 可知，最小数据集中全氮和交换性镁的权重较大，分别为 0.179 和 0.171。对全数据集和最小数据集的各个养分指标进行标准化后带入土壤质量指数计算式中，得出全数据集不同林龄间土

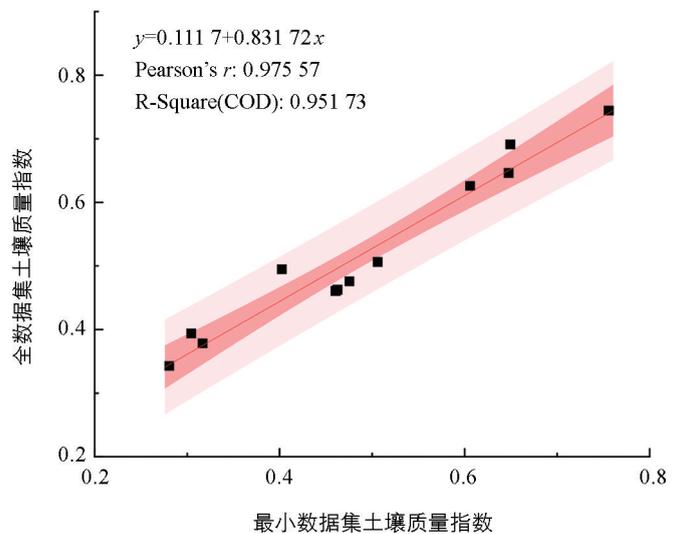


图 1 两种数据集土壤质量指数相关性

壤质量指数为 0.280~0.755，平均值为 0.489；最小数据集的不同林龄间土壤质量指数为 0.342~0.744，平均值为 0.518。

表 7 指标间公因子方差及权重

指标	全数据集 TDS		最小数据集 MDS	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
pH 值	0.799	0.070		
电导率	0.636	0.055		
有机质	0.632	0.055	0.542	0.130
全氮	0.859	0.075	0.748	0.179
全磷	0.898	0.078		
全钾	0.689	0.060	0.631	0.151
碱解氮	0.692	0.060		
有效磷	0.921	0.080		
速效钾	0.765	0.067		
交换性钙	0.608	0.053		
交换性镁	0.818	0.071	0.712	0.171
有效铁	0.804	0.070	0.497	0.119
有效锰	0.771	0.067	0.544	0.130
有效铜	0.729	0.064		
有效锌	0.762	0.066	0.484	0.116

3 讨论和结论

3.1 讨论

3.1.1 不同林龄花椒地土壤肥力水平

土壤的肥力状况直接影响到花椒植株生长情况及产量, 通过主成分分析得出, 土壤有效磷的信息损失量最小, 因此影响花椒地土壤肥力的主要肥力指标为有效磷, 其次为全磷和全氮. 根据主成分分析综合得分结果, 不同林龄花椒地土壤肥力水平从高到低依次为: 林龄 15~20 a、林龄 10~15 a、林龄 0~5 a、林龄 5~10 a, 土壤肥力情况随着花椒种植年限的增长略有提升. 将不同林龄花椒地的土壤养分指标与 2006 年江津区土壤养分指标进行比较^[20], 花椒栽培后有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、有效铁、有效锰和有效铜含量从 13.30 g/kg, 63.70 mg/kg, 7.90 mg/kg, 105.40 mg/kg, 8.80 mg/kg, 32.30 mg/kg, 0.50 mg/kg 增加到 20.94 g/kg, 100.49 mg/kg, 67.02 mg/kg, 327.58 mg/kg, 105.37 mg/kg, 55.28 mg/kg, 1.50 mg/kg. 全国第二次土壤普查数据显示, 江津区灰棕紫泥土土壤肥力指标平均值为: 有机质含量 9.21 g/kg、全氮 0.47 mg/kg、全磷 1.24 mg/kg、碱解氮 23.00 mg/kg、有效磷 4.80 mg/kg、速效钾 71.00 mg/kg. 与表 1 中数据相比, 多年栽培花椒后土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾等指标都有明显提升, 全磷含量略有下降, 表明多年种植花椒可一定程度上有效提升土壤肥力水平^[21].

3.1.2 不同林龄花椒地土壤质量指数

土壤质量是土壤综合属性的反映, 是揭示土壤质地优劣和肥沃程度的重要参考指标, 也是土壤为植物生长提供保水保肥能力的体现^[22-23]. 土地利用方式、耕作措施及施肥管理等都会影响土壤质量的情况^[24-26]. 胡琴等^[27]测定了土壤容重、有机质、全氮、有效磷、速效钾、全盐、pH 以及蔗糖酶和碱性磷酸酶这 9 项土壤质量指标, 通过主成分分析计算土壤质量指数, 对不同开垦年限的黄河三角洲盐碱地进行土壤质量综合评价. 袁野等^[28]选取了 26 项涵盖土壤物理、化学、生物学性质的指标作为全量数据集, 筛选出可用于东北黑土区农田土壤质量评价的最小数据集, 由紧实度、平均质量直径、有机质、全磷、 β -葡萄

糖甘酶、N-乙酰葡萄糖胺糖苷酶构成,并指出不同耕作方式对黑土土壤质量指数的影响从大到小依次为:间隔深松、翻耕、传统耕作、免耕.在本研究中,初步选取 pH 值、电导率、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁、有效铁、有效锰、有效铜、有效锌 15 项土壤化学肥力指标构建全数据集,通过相关性分析精简评价指标集合,选择有机质、全氮、全钾、交换性镁、有效铁、有效锰、有效锌 7 项指标进入最小数据集,评价了不同林龄花椒地土壤化学肥力及质量水平.后续的研究工作中,还需进一步增加对土壤物理、生物学性质的关注,并开展多年定位检查,以期系统阐明多年花椒种植对土壤肥力及质量的影响.

土壤综合质量评价是通过主成分分析,对多个肥力指标进行降维,并建立最小数据集.由于肥力指标之间单位和大小差异较大无法进行综合比较,因此需要对数据进行标准化处理,将肥力指标转换为 0~1 的数值,综合数值越大说明土壤肥力越好、质量指数越高^[28].主成分分析综合得分以及最小数据集的土壤质量指数(图 2)得出的结果,均表示土壤肥力水平和土壤质量指数随种植年限的增加略有增进,从高到低依次为:林龄 15~20 a、林龄 10~15 a、林龄 0~5 a、林龄 5~10 a,林龄 0~5 a 的花椒地土壤质量大于林龄 5~10 a,可能是由于幼苗期施肥量较多.唐海龙等^[29]基于川东丘陵区青花椒种植对土壤肥力的影响研究也发现种植青花椒具有显著的培肥效应,土壤肥力综合值随种植年限增长而升高,与本研究结果基本一致.此外随着种植年限的增加,有效磷、速效钾、交换性镁、有效铜和有效锰的养分指标含量也有所升高.

基于全国第二次土壤普查江津区灰棕紫泥的化学肥力指标数据,进行主成分分析,结果如表 8 所示.将各肥力指标权重和肥力指标标准化值代入土壤质量指数计算公式,计算出灰棕紫泥土种的土壤质量指数为 0.237~0.315.在本研究中,多年花椒种植后土壤质量指数为 0.342~0.744,说明多年花椒种植对土壤质量提升具有一定促进作用.值得说明的是,本研究工作是在花椒已发展成为当地特色农产品并已具有一定规模后,对花椒种植年限影响土壤肥力及质量的初步探索,以期为该产业的可持续发展提供数据参考.

表 8 江津区全国第二次土壤普查灰棕紫泥土指标间公因子方差及权重

指标	公因子方差	权重
有机质	0.766	0.167
全氮	0.82	0.179
全磷	0.59	0.129
碱解氮	0.874	0.191
速效磷	0.627	0.137
速效钾	0.886	0.194

3.1.3 多年花椒种植启示

土壤有效金属微量元素含量丰富,但部分土壤有机质偏低,有机质平均含量为 20.60 g/kg,根据全国第二次土壤普查养分分级评价标准,其中三级有机质含量样品占 37.60%,四级有机质含量样品占

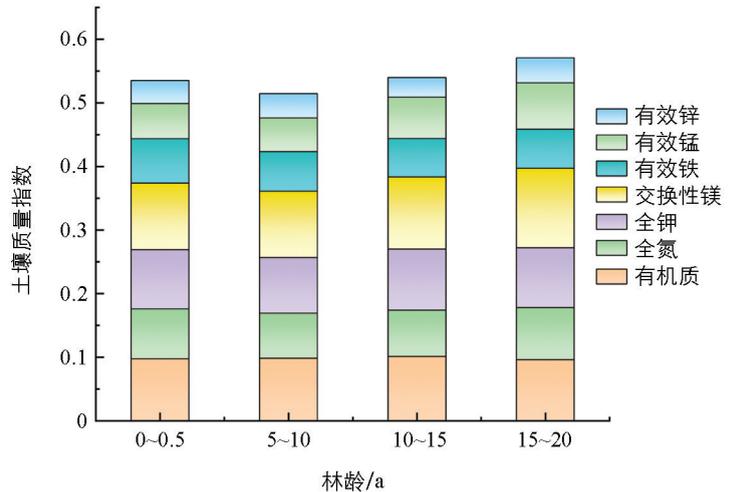


图 2 不同林龄下基于最小数据集的土壤质量指数

46.40%, 可以增加花椒枝条的还田以及施用绿肥等措施进行改善. 样品采集区应结合土壤空间分布特征多配施有机肥, 减少化肥施用量, 以保证花椒绿色生产及土地资源的可持续利用.

根据不同林龄的不同主成分得分可知, 土壤肥力的限制因子不同, 应当通过相应的培肥措施来提高养分利用率和均衡性. 林龄 0~5 a 的花椒地土壤主成分 2 的综合得分最低, 土壤肥力受到 pH 值、全钾和交换性镁的影响, 应注重土壤酸碱度调节及钾肥和镁肥的相应补充; 林龄 5~10 a 的花椒地土壤主成分 1 的综合得分最低, 土壤肥力主要受全氮、有效磷和速效钾限制, 可以在栽培过程中适量补充复合肥; 林龄 10~15 a 的花椒地土壤主成分 3 的综合得分最低, 土壤肥力受有效铜和有效锌影响较大, 可以进行适量补充; 林龄 15~20 a 的花椒地土壤主成分 4 的综合得分最低, 土壤肥力的重要影响因子为有机质、碱解氮和交换性钙, 应增施有机肥, 改善土壤团粒结构.

3.2 结论

同 2006 年土壤养分指标相比, 花椒种植后有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、有效铁、有效锰和有效铜含量分别从 13.30 g/kg, 63.70 mg/kg, 7.90 mg/kg, 105.40 mg/kg, 8.80 mg/kg, 32.30 mg/kg, 0.50 mg/kg 增加到 20.94 g/kg, 100.49 mg/kg, 67.02 mg/kg, 327.58 mg/kg, 105.37 mg/kg, 55.28 mg/kg, 1.50 mg/kg, 提高了 1.57~11.97 倍, 有效锌含量变化不明显; 通过多年花椒种植, 江津花椒种植区灰棕紫泥土土壤质量指数较全国第二次土壤普查时期从 0.237~0.315 增加到 0.342~0.744, 说明多年花椒栽培对土壤质量提升具有一定促进作用; 综合全数据集和最小数据集的评价结果, 不同林龄花椒地土壤肥力水平和质量指数从高到低依次为: 林龄 15~20 a、林龄 10~15 a、林龄 0~5 a、林龄 5~10 a, 意味着土壤肥力和质量随花椒种植年限增加表现出略有增加的趋势, 但各差异间无统计学意义. 根据主成分分析结果得出, 不同林龄花椒地土壤限制因子不同, 应当通过相应的培肥和管理方式来提高养分利用率和均衡性.

参考文献:

- [1] 卢明, 王帅, 王洁, 等. 重庆市花椒生产的产量差及影响因素分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2023(8): 206-213.
- [2] 杨仕曦, 吕广斌, 黄云, 等. 九龙坡花椒种植区地形、土壤肥力与花椒产量的关系 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1823-1832.
- [3] 杨林生, 杨敏, 彭清, 等. 重庆市九叶青花椒施肥现状评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 61-68.
- [4] 郑立臣, 宇万太, 马强, 等. 农田土壤肥力综合评价研究进展 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 156-161.
- [5] 李民军, 杜健. 基于主成分分析和聚类分析的刚察县耕地土壤肥力综合评价 [J]. 中国农学通报, 2023, 39(26): 51-59.
- [6] 杨双琳, 邓利娟, 黄博, 等. 不同年限三七根系丛枝菌根真菌多样性及其与土壤理化性质的相关分析 [J]. 南方农业学报, 54(11): 3217-3227.
- [7] 戚颖, 李铁男, 白雪峰, 等. 秸秆覆盖对寒旱区农田土壤理化性状的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(7): 56-63.
- [8] 叶少萍, 李挺, 张俊涛, 等. 基于主成分分析的古树土壤肥力综合评价 [J]. 生态科学, 2022, 41(1): 196-205.
- [9] 赵敬坤, 陈松柏, 李忠意, 等. 模糊综合评价法判断重庆花椒种植区土壤肥力水平 [J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 206-212.
- [10] 房雪, 杨涵童, 邢金月, 等. 延边州农田栽参后地土壤肥力评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 28-38.
- [11] 杨丹丽, 喻阳华, 钟欣平, 等. 干热河谷石漠化区不同土地利用类型的土壤质量评价 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(6): 1234-1240.
- [12] 王璐, 喻阳华, 秦仕忆, 等. 不同衰老程度顶坛花椒土壤养分质量的评价 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(1): 139-147.

- [13] 刘姣姣, 何静, 陈伟, 等. 花椒连作对土壤化学性质及酶活性的影响 [J]. 分子植物育种, 2019, 17(22): 7545-7550.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 李政昊, 刘斯泓, 李嘉琦, 等. 辽宁省铁岭植烟区土壤肥力特征及综合评价 [J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 631-639.
- [16] 王帅, 赵敬坤, 王洋, 等. 重庆花椒种植区主要类型土壤剖面的肥力特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(11): 40-47.
- [17] 黄婷, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 141-147, 187.
- [18] 高吉喜, 段飞舟, 香宝. 主成分分析在农田土壤环境评价中的应用 [J]. 地理研究, 2006, 25(5): 836-842.
- [19] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用 [J]. 土壤, 2010, 42(3): 415-420.
- [20] 魏勇, 王帅, 赵敬坤, 等. 重庆花椒主产区土壤养分分布特征及综合肥力评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(7): 48-58.
- [21] 四川省农牧厅四川省土壤普查办公室. 四川土种志 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- [22] 徐艳, 王曙光, 郭振, 等. 主成分分析在矿区农田土壤污染分析中的应用 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42(S2): 9-13.
- [23] 李霞, 朱万泽, 舒树森, 等. 基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价 [J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3891-3900.
- [24] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199.
- [25] 祁泽伟, 张慧芋, 李娜娜, 等. 不同秋耕措施对黄土高原春玉米田土壤物理质量的影响 [J]. 土壤, 2021, 53(4): 826-832.
- [26] 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 等. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1561-1568.
- [27] 胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 824-833.
- [28] 袁野, 王浩, 罗洋, 等. 基于最小数据集评价耕作方式对黑土农田土壤质量的影响 [J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 148-157.
- [29] 唐海龙, 龚伟, 王景燕, 等. 川东丘陵区青花椒种植对土壤肥力的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1597-1606.

责任编辑 包颖
崔玉洁